

**КУВАЕВИТ ( $\text{Ir}_5\text{Ni}_{10}\text{S}_{16}$ ) — НОВЫЙ МИНЕРАЛЬНЫЙ ВИД, ЕГО АССОЦИИ И ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕЗИСА (россыпная зона р. Сисим, Восточный Саян)****А.Ю. Барков<sup>1</sup>, Н.Д. Толстых<sup>2</sup>, Р.Ф. Мартин<sup>3</sup>, Н. Тамура<sup>4</sup>, Чи Ма<sup>5</sup>, А.А. Никифоров<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Череповецкий государственный университет, 162600, Череповец, просп. Луначарского, 5, Россия<sup>2</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева, СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия<sup>3</sup> Department of Earth and Planetary Sciences, McGill University, 3450 University Street, Montreal, Quebec H3A 0E8, Canada<sup>4</sup> Advanced Light Source, 1 Cyclotron Road, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720-8229, USA<sup>5</sup> Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, 1200 East California Blvd., Caltech, 170-25 Pasadena, CA 91125, USA

Куваевит ( $(\text{Ir,Rh})_5(\text{Ni,Fe,Cu})_{10}\text{S}_{16}$ ) формирует небольшие зерна (до 20 мкм по ширине) во включениях глобулярной формы, находящихся в зернах Os-Ir-(Ru) сплавов (до 0.5 мм) в рудопроявлениях р. Ко Сисимской россыпной зоны, Восточный Саян. Основными ассоциирующими с ним минералами являются Rh-содержащий пентландит и/или обертюрит, минералы серии лаурит—эрликманит и Pt-(Pd)-Fe сплавы. В отраженном свете он имеет серый до коричнево-серого цвет. Двухотражение слабое или отсутствует. Плеохроизм не отмечается или весьма незначителен в серых до светло-коричневого оттенках. Оптическая анизотропия слабая, от серого до светло-желтого тонов. Значение вычисленной плотности 6.37 г/см<sup>3</sup>. Состав куваевита по результатам микросондовых анализов ( $n = 3$ ), выполненных методом волновой дисперсионной спектроскопии (ВДС): Cu 5.94 (4.39–6.89), Ni 13.95 (13.80–14.24), Fe 10.95 (10.18–11.97), Co 0.07 (0.06–0.10), Ir 32.38 (32.19–32.73), Rh 7.27 (7.22–7.31), Pt 1.91 (1.67–2.06), Os 0.05 (0–0.09), Ru 0.05 (0.04–0.05), S 27.06 (26.77–27.41), сумма 99.63 мас.%. Эмпирические формулы, рассчитанные по средним результатам:  $(\text{Ir}_{3.22}\text{Rh}_{1.35}\text{Pt}_{0.19}\text{Ru}_{0.01}\text{Os}_{0.01}\Sigma_{4.78}(\text{Ni}_{4.54}\text{Fe}_{3.75}\text{Cu}_{1.79}\text{Co}_{0.02})\Sigma_{10.10}\text{S}_{16.13}$  (ВДС) и  $(\text{Ir}_{3.23}\text{Rh}_{1.43}\text{Pt}_{0.25})\Sigma_{4.91}(\text{Ni}_{4.49}\text{Fe}_{3.57}\text{Cu}_{1.86}\text{Co}_{0.06})\Sigma_{9.98}\text{S}_{16.11}$  (СЭМ/ЭДС;  $n = 56$ ) основаны на значении суммы 31 атомов в соответствии с данными структурного изучения торривейзерита (родиевого аналога). Куваевит формирует значительные серии твердых растворов с торривейзеритом, тамураитом и ферроторривейзеритом, которым он изоструктурен. Определение симметрии куваевита выполнено методом микродифракции Лауэ с использованием синхротронного излучения, результаты которого хорошо согласуются с тригональной сингонией и приводят к следующим параметрам ячейки:  $a = 7.079(5) \text{ \AA}$ ,  $c = 34.344(12) \text{ \AA}$ ,  $V = 1490(2) \text{ \AA}^3$ ;  $Z = 3$ . Значение  $c/a$  составляет 4.852. Вероятная пространственная группа,  $R\bar{3}m$  (#166), принята по данным структурного исследования торривейзерита. Восемь наиболее характерных отражений рентгенограммы куваевита, рассчитанных по результатам его микродифракционного изучения [ $d$  в  $\text{ \AA}(hkl)(I)$ ], следующие: 3.0530(20  $\bar{1}$ )(43), 3.0103(2  $\bar{1}$  6)(100), 2.9962(1 0 10)(53), 2.7991(205)(50), 2.4946(208)(31), 1.9208(3  $\bar{1}$  10)(41), 1.7697(4  $\bar{2}$  0)(73), 1.7582(2 0 16)(66). Результаты изучения двух кристаллов куваевита методом монокристаллической дифракции электронов обратного рассеяния (EBSD) хорошо индексируются на основе группы  $R\bar{3}m$ . Наблюдаются значительные вариации составов куваевита и родственных ему сульфидов в россыпях р. Ко, в целом в Сисимской зоне и в других рудопроявлениях мира. Ассоциации минералов ЭПГ в рудопроявлениях р. Ко и Сисимской зоны генетически связываются с коренными зонами хромитоносных ультрамафитов (серпентинитов) лысанского комплекса. Куваевит и другие минералы в полиминеральных включениях, вмещаемые сплавами Os-Ir-(Ru), формировались из капель остаточного расплава. В нем аккумуляровались избыточные и «несовместимые» компоненты, которые не могли войти в кристаллическую структуру сплава, включая литофильные элементы, халькогены (S, Te), полуметаллы (As, Sb, Bi), основные металлы (Fe, Ni, Cu), а также сравнительно низкотемпературные ЭПГ (Pt, Pd) и Rh. Локально установлены свидетельства метастабильной кристаллизации и переохлаждения силикатного расплава, а также эффективной дифференциации и фракционирования S и рудных компонентов при формировании включений. Куваевит назван в честь известного геолога, геофизика и писателя О.М. Куваева (1934—1975).

*Куваевит, минералы элементов группы платины, сульфид иридия и никеля, россыпные рудопроявления, река Ко, россыпная зона Сисим, лысанский мафит-ультрамафитовый комплекс, Восточный Саян, Красноярский край*

# KUVAEVITE, $\text{Ir}_5\text{Ni}_{10}\text{S}_{16}$ , A NEW MINERAL SPECIES, ITS ASSOCIATIONS AND GENETIC FEATURES, FROM THE SISIM RIVER PLACER ZONE, EASTERN SAYANS

A.Y. Barkov, N.D. Tolstykh, R.F. Martin, N. Tamura, Chi Ma, A.A. Nikiforov

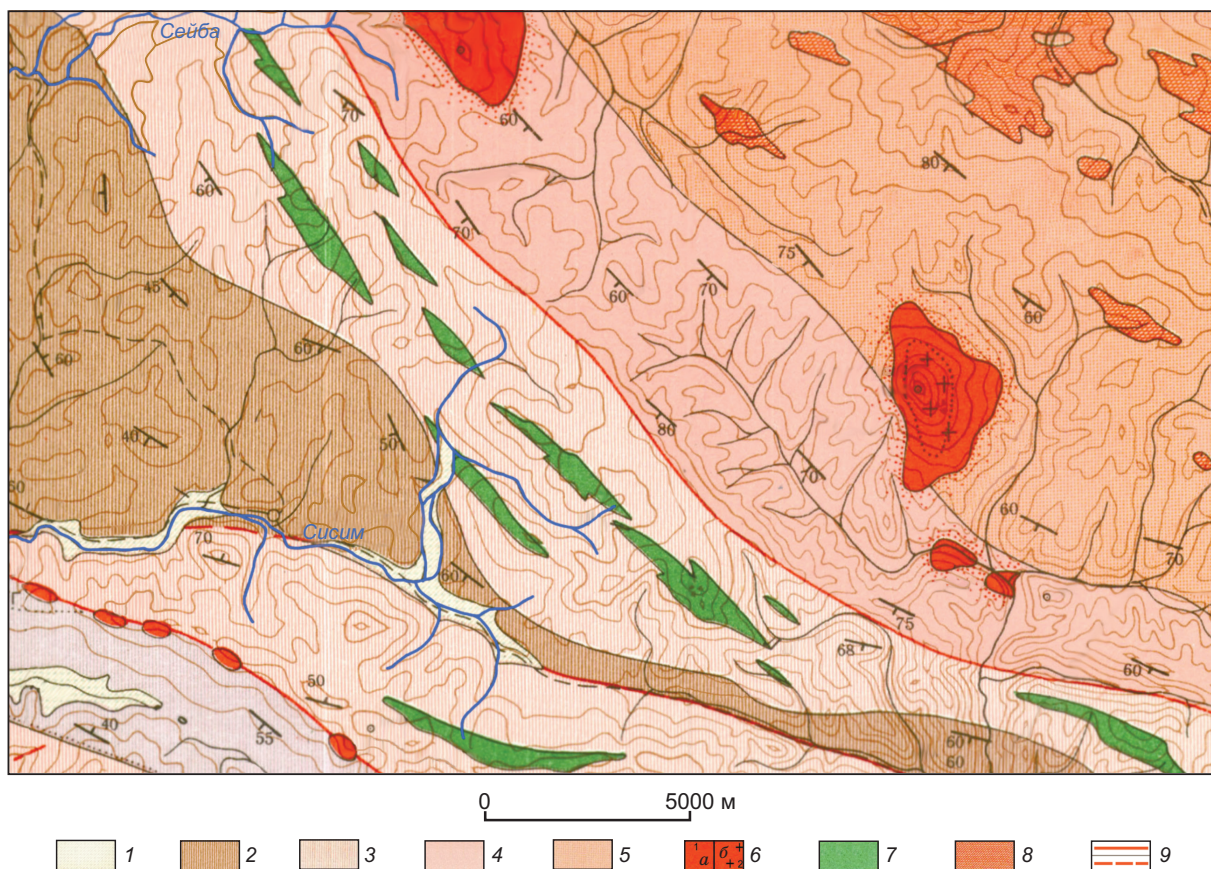
Kuvaevite ( $(\text{Ir,Rh})_5(\text{Ni,Fe,Cu})_{10}\text{S}_{16}$ ) forms small grains (up to 20  $\mu\text{m}$  across) in globular inclusions hosted by grains of Os-Ir-(Ru) alloys (up to 0.5 mm) in ore occurrences along the Ko River in the Sisim placer zone, Eastern Sayans. Rh-bearing pentlandite or oberthürite (or both), the minerals of the laurite-erlichmanite series and Pt-(Pd)-Fe alloys are the main associated minerals. Kuvaevite is gray to brownish gray in color in reflected light. Its birefractance is weak to absent. It is slightly pleochroic in gray to light brown shades, and slightly anisotropic, from gray to light yellow shades. Its calculated density is 6.37  $\text{g/cm}^3$ . According to results of microprobe analyses ( $n = 3$ ) carried out using wavelength-dispersive spectrometry, WDS, the composition of kuvaevite is: Cu 5.94 (4.39—6.89), Ni 13.95 (13.80—14.24), Fe 10.95 (10.18—11.97), Co 0.07 (0.06—0.10), Ir 32.38 (32.19—32.73), Rh 7.27 (7.22—7.31), Pt 1.91 (1.67—2.06), Os 0.05 (0—0.09), Ru 0.05 (0.04—0.05), S 27.06 (26.77—27.41), total 99.63 wt.%. The empirical formulae calculated using the mean results of analyses are:  $(\text{Ir}_{3.22}\text{Rh}_{1.35}\text{Pt}_{0.19}\text{Ru}_{0.01}\text{Os}_{0.01})_{\Sigma 4.78}(\text{Ni}_{4.54}\text{Fe}_{3.75}\text{Cu}_{1.79}\text{Co}_{0.02})_{\Sigma 10.10}\text{S}_{16.13}$  (WDS) and  $(\text{Ir}_{3.23}\text{Rh}_{1.43}\text{Pt}_{0.25})_{\Sigma 4.91}(\text{Ni}_{4.49}\text{Fe}_{3.57}\text{Cu}_{1.86}\text{Co}_{0.06})_{\Sigma 9.98}\text{S}_{16.11}$  (SEM/EDS;  $n = 56$ ). These are based on a total of 31 atoms according to structural data obtained for torryweiserite, the rhodium-dominant analogue. Kuvaevite forms solid-solution series with torryweiserite, tamuraite and ferrotorryweiserite, all these being isostructural. The symmetry of kuvaevite was determined using the synchrotron Laue microdiffraction; the results are in good agreement with the trigonal crystal system and give the following unit-cell parameters:  $a = 7.079(5)$  Å,  $c = 34.344(12)$  Å,  $V = 1490(2)$  Å<sup>3</sup>;  $Z = 3$ . The ratio  $c/a$  is 4.852. The probable space-group,  $R\bar{3}m$  (#166), is based on structural results for torryweiserite. The strongest eight reflections in the X-ray diffraction pattern derived from the microdiffraction study [ $d$  in Å(hkl) (I)], are the following: 3.0530(20  $\bar{1}$ )(43), 3.0103(2  $\bar{1}$  6)(100), 2.9962(1 010)(53), 2.7991(205)(50), 2.4946(208)(31), 1.9208(3  $\bar{1}$  10)(41), 1.7697(4  $\bar{2}$  0)(73), 1.7582(20 16)(66). The results of the electron backscatter diffraction study (EBSD) of two kuvaevite crystals are well-indexed based on the  $R\bar{3}m$  space group. Kuvaevite and related sulfides significantly vary in composition in the Ko River placer, in the entire Sisim zone, and in some other ore occurrences worldwide. Associations of platinum-group minerals observed in ore occurrences at Ko River and in the Sisim zone seem to be genetically related to bedrock zones of chromite-bearing ultramafic rocks (serpentinites) of the Lysanskiy complex. Kuvaevite and other minerals present in the polymineralic inclusions, hosted by Os-Ir-(Ru) alloys, formed from droplets of residual melt. This melt accumulated the “incompatible” elements, which could not be incorporated into the structure of the host alloy, including lithophile elements, chalcogens (S, Te), semimetals (As, Sb, Bi), base metals (Fe, Ni, Cu), as well as relatively low-temperature PGE species (Pt, Pd) and Rh. There are local data on metastable crystallization and undercooling of the silicate melt, as well as effective differentiation and fractionation of S and ore components during the crystallization of these inclusions. Kuvaevite is named after O.M. Kuvaev (1934—1975), a prominent geologist, geophysicist and writer.

*Kuvaevite, platinum-group minerals, iridium and nickel sulfide, placer deposits, Ko River, the Sisim placer zone, the Lysanskiy mafic-ultramafic complex, Eastern Sayans, Krasnoyarsk Territory*

## ВВЕДЕНИЕ

Самородное золото добывалось в россыпях р. Сисим и ее притоков (реки Ко, Сейба и др.) на юге Красноярского края с XIX в. или даже ранее. Достоверные находки минералов элементов группы платины (МЭПГ) в этих россыпях известны с начала прошлого века, когда впервые описаны зерна осмистого иридия [Высоцкий, 1933]. Исследованиями [Кривенко и др., 1994; Толстых, Кривенко, 1994] в регионе установлены значительные проявления россыпных зерен МЭПГ. Сонахождение золота с МЭПГ обусловлено периодами длительного развития, включая этап неотектонической реактивации в ходе формирования современных речных систем региона [Цыкин, Попова, 2008]. В качестве коренного источника МЭПГ зоны Сисим предложен лысанский расслоенный комплекс [Barkov et al., 2018a], слагаемый выходами габбро, клино- и ортопироксенитов и серпентинитов (рис. 1) [Щелковников, Ткач, 1962; Глазунов, 1975]. Целью нашей работы является описание характеристик и ассоциаций нового минерала куваевит с обсуждением особенностей его формирования, что имеет определенную рудогенетическую значимость. Новый минерал с идеальной формулой  $\text{Ir}_5\text{Ni}_{10}\text{S}_{16}$ , изученный в россыпных рудопроявлениях р. Ко, и родственные ему сульфиды являются весьма характерными для Сисимской зоны. Имеются их вероятные аналоги и в других рудных месторождениях, которые также обсуждаются. Куваевит назван в честь легендарного геолога, геофизика и писателя Олега Михайловича Куваева (1934—1975), оказавшего колоссальное влияние на геологов и романтиков разных поколений. Новый минерал и его название рассмотрены и утверждены Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации минералов Международной минералогической ассоциации (IMA 2020-043). Голотипные образцы куваевита и ассоциирующих с ним видов переданы на хранение в Сибирский геологический музей при Институте геологии и минералогии им В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск (каталожный № III-102/1).





**Рис. 1. Геологическая карта района развития речной сети Сисим (Восточный Саян), по данным [Щелковников, Ткач, 1962; Глазунов, 1975].**

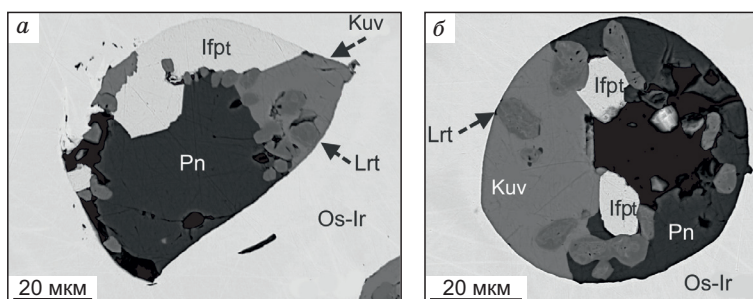
1 – аллювиальные отложения; 2 – овсянковская свита, мраморизованные известняки; 3 – кувайская серия, кристаллические сланцы, рассланцованные и амфиболитизированные основные эффузивы; 4 – жайминская свита, кристаллические известняки с прослоями сланцев (кварцево-графитистые и углисто-кремнистые сланцы); 5 – дербинская свита, графитистые мраморы, кристаллические сланцы; 6 – силурийский (?) (беллыкский) интрузивный комплекс: а – биотитовые граниты, граносиениты, б – амфиболовые габбро, диориты; 7 – верхнепротерозойский (лысанский) интрузивный комплекс, габбро, пироксениты, серпентиниты; 8 – нижнепротерозойский (дербинский) интрузивный комплекс, микроклиновые граниты; 9 – разломы: а – достоверные, б – предполагаемые.

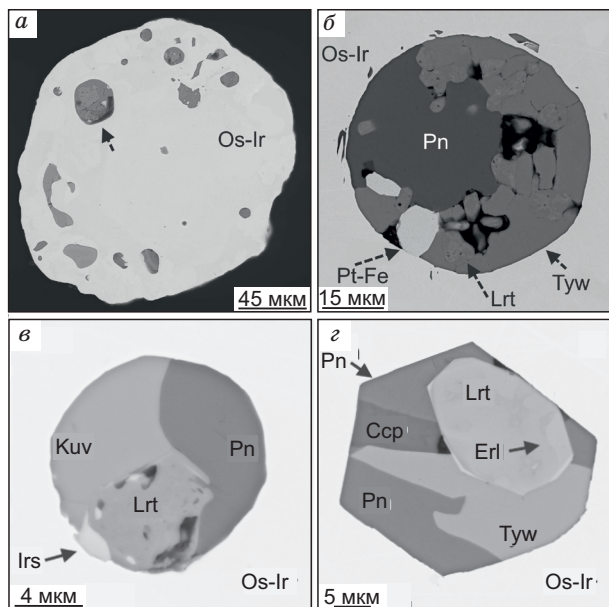
### СВОЙСТВА И СИММЕТРИЯ КУВАЕВИТА

Зерна куваевита шириной до 20 мкм (рис. 2) являются частью полиминеральной ассоциации, развитой в каплевидных или округло-удлиненных включениях ( $\leq 70$  мкм) в россыпных зернах Os-Ir сплавов, размеры которых редко превышают 0.5 мм. Составы минерала-хозяина обычно соответствуют самородному осмию с неизменно значительным содержанием Ir и варьирующим Ru. Сплавы с преобладанием иридия имеют подчиненное развитие. В целом поле твердых растворов системы Os—Ir—Ru в сисимской россыпной зоне ограничивается линией  $Ru/Ir = 1$ , локализуясь в сравнительно обедненной Ru части сис-

**Рис. 2. Изображения в обратнорассеянных электронах, показывающие примеры изученных каплевидных включений в россыпных зернах Os-Ir сплавов (здесь и далее показаны символом Os-Ir) из рудопоявления р. Ко Сисимской россыпной зоны (а, б).**

Включения сформированы куваевитом (Kuv), Rh-содержащим пентландитом (Pn) или обертюритом, лауритом (Lrt) и Pt-Fe сплавом, близким по составу изоферроплатине (Ifpt).





**Рис. 3.** Ассоциации и текстурные особенности включений минералов ЭПГ в россыпных зернах Os-Ir сплавов из рудопроявлений р. Ко.

*a* — в округлом зерне иридоосмия (Os-Ir) состава  $Os_{56.6}Ir_{29.2}Ru_{12.9}Ni_{1.4}$  стрелкой указано положение одного из каплевидных включений, слагаемых полиминеральной ассоциацией с преобладанием сульфидов (включения серого цвета); *б* — каплевидное включение слагается торривейзеритом (Tyw), Rh-содержащим пентландитом (Pn) или обертуритом, лауритом (Lrt) и Pt-Fe сплавом, которые вмещаются зерном осмия состава  $Os_{47.0}Ir_{26.6}Ru_{22.2}Pt_{3.1}Ni_{1.1}$ , *в* — во включении минеральная ассоциация представлена куваевитом (Kuv), Rh-содержащим пентландитом (Pn), лауритом (Lrt) и ирарситом (Irs), *г* — присутствуют торривейзерит (Tyw), Rh-содержащий пентландит (Pn), халькопирит (Ccp) и зональный лаурит (Lrt) с оторочкой фазы близкого эрликманиту состава (Erl, светлое). Составы зерен вмещающего осмия:  $Os_{54.9}Ir_{32.4}Ru_{12.8}$  (*б*) и  $Os_{62.7}Ir_{27.1}Ru_{9.2}Ni_{1.1}$  (*г*).

темы с эпизодическими проявлениями рутениридосмина [Barkov et al., 2018a, 2019]. Основными минералами в этих включениях являются Rh-содержащий пентландит и/или обертурит, минералы серии лаурит—эрликманит и Pt-(Pd)-Fe сплавы (рис. 3, *a—г*). Границы выделений куваевита с родиевым пентландитом (т.е. минералом группы пентландита или обертуритом) отчетливо дискретные.

В отраженном свете куваевит имеет серый до коричневатого-серого цвет. Двухотражение слабое или отсутствует. Плеохроизм не отмечается или весьма незначителен в серых до светло-коричневого оттенках. Оптическая анизотропия слабая, от серого до светло-желтого тонов. Его микротвердость, значения отражательной способности и плотность не могли быть измерены по причине чрезмерно мелких размеров. Значение вычисленной плотности ( $6.37 \text{ г/см}^3$ ) основано на эмпирической формуле и объеме элементарной ячейки, определенном микродифракционным изучением.

Определение химического состава куваевита (табл. 1) выполнялось микрозондовым методом с использованием волновой дисперсионной спектроскопии (ВДС), а также количественным микроанализом с применением энергодисперсионной спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ/ЭДС). Отмечается весьма хорошая сходимость этих данных. Эмпирическая формула минерала, основанная на средних составах, имеет вид  $(Ir_{3.22}Rh_{1.35}Pt_{0.19}Ru_{0.01}Os_{0.01})_{\Sigma 4.78}(Ni_{4.54}Fe_{3.75}Cu_{1.79}Co_{0.02})_{\Sigma 10.10}S_{16.13}$ , по данным ВДС, и  $(Ir_{3.23}Rh_{1.43}Pt_{0.25})_{\Sigma 4.91}(Ni_{4.49}Fe_{3.57}Cu_{1.86}Co_{0.06})_{\Sigma 9.98}S_{16.11}$  по данным СЭМ/ЭДС. Эта формула вычислена на основе значения суммы 31 атома на формульную единицу (а. ф. е.) в соответствии с данными структурного изучения торривейзерита ( $Rh_5Ni_{10}S_{16}$ ) [McDonald et al., 2021], являющегося родиевым аналогом куваевита. Она указывает на вероятность наличия весьма малых вакансий в структурной позиции иридия.

Куваевит формирует значительные серии твердых растворов (табл. 2) с торривейзеритом, тамураитом ( $Ir_5Fe_{10}S_{16}$ ) и ферроторривейзеритом ( $Rh_5Fe_{10}S_{16}$ ), которым он изоструктурен [Barkov et al., 2021a, b]. Вероятен весьма ограниченный изоморфизм элементов, входящих в разные структурные позиции: (Ir+Rh+Pt) vs. (Ni+Fe+Co)+Cu, однако с неизменным сохранением теоретической суммы металлов: 15 а. ф. е. (см. табл. 2). Общая формула куваевита,  $(Ir,Rh)_5(Ni,Fe,Cu)_{10}S_{16}$ , соответствует идеальной  $Ir_5Ni_{10}S_{16}$ , которая предполагает следующий состав: Ir 46.63, Ni 28.48, S 24.89, рассчитанный на сумму 100 мас. %.

В связи с недостаточно крупными размерами зерен куваевита определение его симметрии выполнено методом микродифракции Лауэ, относящимся к монокристалльным методикам, с использованием синхротронного излучения и применением детектора PILATUS 1M в отражательной геометрии. Лауэграммы куваевита анализировались и индексировались с использованием программного обеспечения XMAS v.6 [Tamura, 2014]. Результаты микродифракционного изучения хорошо согласуются с тригональной сингонией куваевита и приводят к следующим параметрам его элементарной ячейки:  $a = 7.079(5) \text{ \AA}$ ,  $c = 34.344(12) \text{ \AA}$ ,  $V = 1490(2) \text{ \AA}^3$ ;  $Z = 3$ . Значение  $c/a$  составляет 4.852. Вероятная пространственная группа ( $R\bar{3}m$  (#166)), принимается по данным структурного исследования родиевого аналога куваевита — торривейзерита [McDonald et al., 2021].

В таблице 3 приводится сопоставление отражений куваевита, рассчитанных и индексированных на основе результатов микродифракции Лауэ, с рентгенограммой «джиченгита» [Yü et al., 2011], кото-



Таблица 1.

Химический состав (мас. %) куваевита из россыпей р. Ко

Элемент	Среднее ( $n = 3$ ) ВДС*	Ряд значений	Среднее ( $n = 56$ ) СЭМ/ЭДС**	Ряд значений
Cu	5.94	4.39—6.89	6.11	4.09—7.03
Ni	13.95	13.80—14.24	13.63	12.12—14.43
Fe	10.95	10.18—11.97	10.30	8.30—12.68
Co	0.07	0.06—0.10	0.19	0—1.01
Ir	32.38	32.19—32.73	32.03	23.54—44.77
Rh	7.27	7.22—7.31	7.58	0—13.12
Pt	1.91	1.67—2.06	2.50	0—7.22
Os	0.05	0—0.09	0	0
Ru	0.05	0.04—0.05	0	0
S	27.06	26.77—27.41	26.69	24.55—28.21
Сумма	99.63	—	99.03	—

Примечание. Ноль — содержания элемента ниже предела его обнаружения;  $n$  — число анализов.

\* Результаты электронно-зондового микроанализа, выполненного методом волновой дисперсионной спектроскопии на установке JEOL JXA 8900L при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 20 нА с диаметром зонда 3 мкм. Аналитические линии:  $\text{CuL}_{\alpha}$ ,  $\text{NiK}_{\alpha}$ ,  $\text{FeK}_{\alpha}$ ,  $\text{CoK}_{\alpha}$ ,  $\text{IrL}_{\alpha}$ ,  $\text{RhL}_{\alpha}$ ,  $\text{PtL}_{\beta}$ ,  $\text{OsM}_{\alpha}$ ,  $\text{RuL}_{\alpha}$ ,  $\text{SK}_{\alpha}$ . Метод коррекций: PRZ. Стандарты: чистые элементы и синтетический пентландит.

\*\* Результаты количественного микроанализа методом энергодисперсионной спектроскопии с использованием сканирующей электронной микроскопии на установке MIRA 3 LMU (Tescan), оборудованной системой INCA Energy 450 XMax 80 (Oxford Instruments Nanoanalysis). Аналитические условия: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1.6 нА.

рый является незазванным аналогом куваевита. Минералогические характеристики «джиченгита» рассмотрены, однако он не утвержден комиссией Международной минералогической ассоциации. Минерал представлялся с формулой вида  $\text{Ir}_5(\text{Ni}, \text{Fe}, \text{Cu})_{10}\text{S}_{17.5}$ , сходными с куваевитом размерами ячейки:  $a = 7.0745$  (14) Å,  $c = 34.267$  (10) Å, но с предположением другой пространственной группы  $R\bar{3}m$  [Yü et al., 2011]. Средний состав «джиченгита» (Cu 4.77, Ni 12.48, Fe 10.03, Co 0.78, Ir 46.98, S 25.76, сумма 100.80 мас. %), может быть, однако, вполне удовлетворительно пересчитан на формулу куваевита:  $\text{Ir}_{4.96}(\text{Ni}_{4.31}\text{Fe}_{3.64}\text{Cu}_{1.52}\text{Co}_{0.27})\Sigma_{9.75}\text{S}_{16.30}$ .

В дополнение к методу микро-Лауэ два зерна куваевита (рис. 4) исследованы методом монокристаллической дифракции электронов обратного рассеяния (EBSD) с использованием системы HKL EBSD на сканирующем микроскопе ZEISS 1550VP с полевой эмиссией. Изучение проводилось при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 6 нА, при угле  $70^\circ$  и давлении 25 Па с использованием узкофокусированного пучка электронов диаметром несколько нанометров и разрешением  $\sim 30$  нм. Калибровка системы осуществлена с применением монокристаллического кремния. Результаты EBSD, полученные на двух кристаллах куваевита (см. рис. 4), хорошо индексируются на основе пространственной группы  $R\bar{3}m$ , принятой для куваевита по аналогии с его структурным аналогом — торривейзеритом [McDonald et al., 2021].

По аналогии с торривейзеритом кристаллическая структура куваевита, вероятно, образована тремя слоями многогранников, сложенных вдоль [001]. Первый слой октаэдров  $\text{IrS}_6$  со смежными гранями содержит октаэдрические пустоты, подобные известным в диоктаэдрических слюдах. Второй слой имеет смешанный характер и складывается октаэдрами  $\text{Ir}_2\text{S}_6$  в центре и тетраэдрами  $\text{NiS}_4$  и  $\text{Ni}_2\text{S}_4$ . Третий слой содержит двойной пласт тетраэдров  $\text{Ni}_3\text{S}_4$  со смежными вдоль [001] гранями, формируя шестичленные кольца  $\text{Ni}_3\text{S}_4$ . Структура напоминает таковую синтетического соединения  $\text{Cu}_4\text{Sn}_7\text{S}_{16}$  [Jemetio et al., 2006]. Она детально описывается и иллюстрируется в статье, посвященной торривейзериту [McDonald et al., 2021].

### РУДНЫЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ

Ассоциации МЭПГ и других рудных минералов, установленные в россыпях р. Ко в дополнение к куваевиту, торривейзериту, тамураиту и ферроторривейзериту, отличаются существенным разнообразием (табл. 4). Как отмечалось, преобладают осмий и иридий, россыпные зерна которых содержат включения других минералов. Сульфидные Fe-Ni-Cu минералы в таких включениях представлены троилитом, Rh-содержащим пентландитом (и/или обертюритом), халькопиритом, а также кубанитом и/или изокубанитом. Интересно отметить, что троилит ранее отмечался в коренных породах лысанского комп-

Таблица 2.

**Составы куваевита, тамураита, торривейзерита и ферроторривейзерита  
из россыпных ассоциаций р. Ко Сисимской зоны, Восточный Саян**

№	Метод	Символ	Cu	Ni	Fe	Co	Ir	Rh	Os	Ru	Pt	S	Сумма
			мас.%										
1	ВДС	Kuv	5.96	13.32	11.62	0	26.03	12.87	0	0	2.22	27.43	99.45
2	»	»	4.09	14.37	12.38	0.09	33.01	7.11	0.10	0	2.00	26.90	100.05
3	»	»	6.56	14.22	10.67	0.04	28.11	10.21	0.06	0.03	2.19	27.12	99.21
4	»	»	6.73	13.97	10.70	0.06	28.12	10.39	0.03	0	2.00	27.25	99.26
5	СЭМ/ЭДС	»	6.36	14.39	10.10	0	28.77	10.28	0	0	2.21	26.73	98.84
6	»	»	6.26	13.52	10.02	0	33.30	6.62	0	0	2.95	25.97	98.64
7	ВДС	Tmr	6.36	12.13	13.21	0.07	30.68	8.95	0.04	0.03	1.43	27.25	100.16
8	»	»	6.24	11.91	13.74	0.07	28.05	10.48	0.04	0.02	1.87	27.85	100.27
9	СЭМ/ЭДС	»	5.69	11.90	13.20	0	29.7	9.63	0	0	2.38	27.34	99.84
10	ВДС	Tyw	2.62	18.74	13.58	0.12	4.24	29.32	0	0.01	0.11	31.20	99.95
11	»	»	1.90	18.49	13.23	0.12	4.00	30.99	0	0.32	0.04	31.00	100.09
12	»	»	7.15	16.37	9.70	0.05	17.94	17.93	0.04	0.03	1.91	28.80	99.92
13	»	»	6.30	14.85	13.09	0.05	10.57	23.93	0	0.01	0.62	30.00	99.42
14	СЭМ/ЭДС	»	4.82	17.88	12.19	0	4.70	28.92	0	0	0	30.83	99.34
15	»	»	6.64	13.64	11.23	0	22.63	13.31	0	0	4.67	27.76	99.88
16	ВДС	Ftyw	3.50	14.85	14.17	0.10	21.87	16.36	0.04	0	0.24	28.61	99.75
17	»	»	3.42	14.54	14.33	0.11	21.46	16.78	0.02	0	0.30	28.96	99.91
18	»	»	6.40	12.74	13.97	0.07	15.75	20.32	0.07	0.13	0.94	29.38	99.77
19	СЭМ/ЭДС	»	6.43	12.64	13.38	0	16.41	20.68	0	0	1.72	29.31	100.57
20	»	»	5.63	13.64	13.90	0	2.47	30.72	1.08	0	0	30.65	98.09

№	Метод	Символ	Cu	Ni	Fe	Co	Σ	Ir	Rh	Os	Ru	Pt	Σ	ΣMe	S
			31 а.ф.е.												
1	ВДС	Kuv	1.76	4.25	3.89	0	9.90	2.53	2.34	0	0	0.21	5.09	14.99	16.01
2	»	»	1.23	4.67	4.23	0.03	10.17	3.28	1.32	0.01	0	0.20	4.81	14.97	16.03
3	»	»	1.95	4.58	3.61	0.01	10.15	2.76	1.87	0.01	0	0.21	4.86	15.01	15.99
4	»	»	2.00	4.49	3.61	0.02	10.12	2.76	1.90	0	0	0.19	4.86	14.97	16.03
5	СЭМ/ЭДС	»	1.91	4.69	3.46	0	10.06	2.86	1.91	0	0	0.22	4.99	15.05	15.95
6	»	»	1.94	4.54	3.54	0	10.03	3.42	1.27	0	0	0.30	4.99	15.02	15.98
7	ВДС	Tmr	1.88	3.88	4.45	0.02	10.23	3.00	1.63	0	0.01	0.14	4.78	15.02	15.98
8	»	»	1.82	3.76	4.55	0.02	10.15	2.70	1.88	0	0	0.18	4.77	14.92	16.08
9	СЭМ/ЭДС	»	1.69	3.83	4.46	0	9.98	2.92	1.77	0	0	0.23	4.92	14.90	16.10
10	ВДС	Tyw	0.68	5.25	4.00	0.03	9.95	0.36	4.68	0	0	0.01	5.06	15.01	15.99
11	»	»	0.49	5.20	3.91	0.03	9.65	0.34	4.98	0	0.05	0	5.38	15.02	15.98
12	»	»	2.00	4.96	3.09	0.02	10.07	1.66	3.10	0	0.01	0.17	4.94	15.01	15.99
13	»	»	1.69	4.32	4.00	0.01	10.03	0.94	3.97	0	0	0.05	4.97	15.01	15.99
14	СЭМ/ЭДС	»	1.26	5.06	3.63	0	9.95	0.41	4.67	0	0	0	5.08	15.02	15.98
15	»	»	1.93	4.30	3.72	0	9.96	2.18	2.39	0	0	0.44	5.02	14.97	16.03
16	ВДС	Ftyw	0.99	4.53	4.55	0.03	10.10	2.04	2.85	0	0	0.02	4.91	15.01	15.99
17	»	»	0.96	4.41	4.57	0.03	9.98	1.99	2.91	0	0	0.03	4.92	14.90	16.10
18	»	»	1.76	3.80	4.38	0.02	9.96	1.43	3.46	0.01	0.02	0.08	5.00	14.96	16.04
19	СЭМ/ЭДС	»	1.78	3.78	4.21	0	9.76	1.50	3.53	0	0	0.15	5.18	14.95	16.05
20	»	»	1.49	3.91	4.19	0	9.59	0.22	5.02	0.10	0	0	5.33	14.92	16.08

Примечание. Составы куваевита (Kuv), тамураита (Tmr), торривейзерита (Tyw) и ферроторривейзерита (Ftyw) даны по результатам электронно-зондового микроанализа, выполненного методом волновой дисперсионной спектроскопии (ВДС) и количественного микроанализа методом энергодисперсионной спектроскопии с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ/ЭДС). Pd не обнаружен. Ноль — содержания элемента ниже предела его обнаружения.

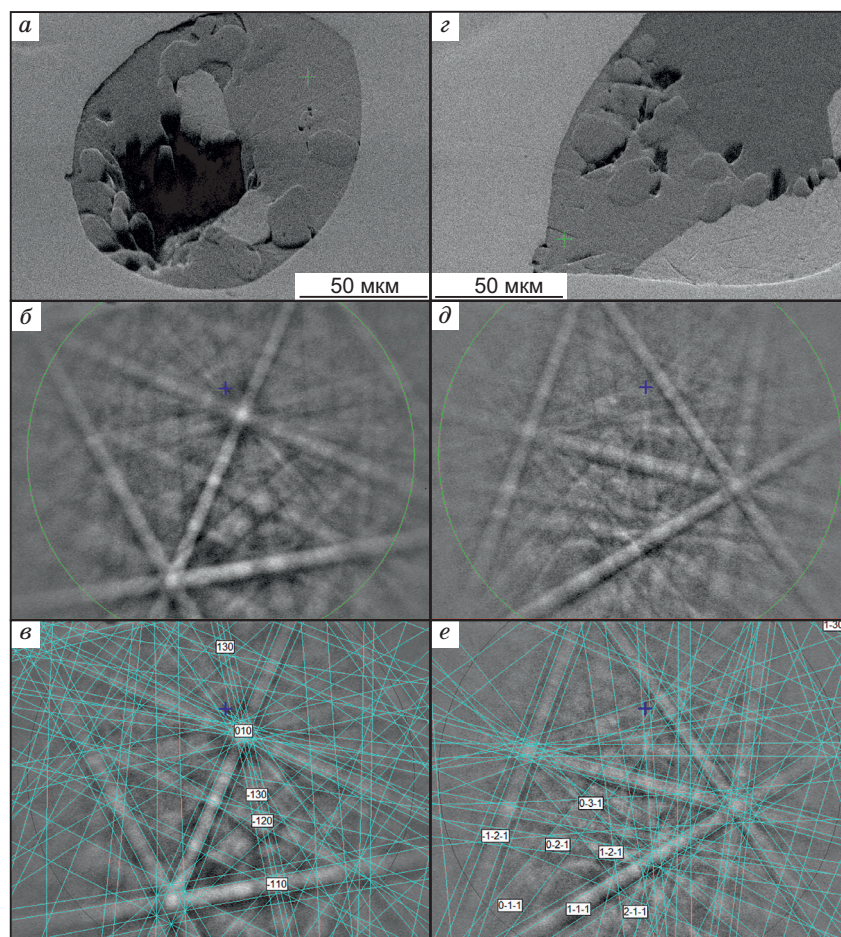


Рис. 4. Картины дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD) и линии Кикучи, полученные на двух зернах куваевита (а—е), изображенных на рис. 2, а, б (точки анализа отмечены зеленым крестиком на рис. 4, а и з), где указаны значения индексов, соответствующих пространственной группе  $R\bar{3}m$ .

лекса [Глазунов, 1975]. Составы зерен пентландита (см. табл. 4) обычно рассчитываются на формулу  $(\text{Rh,Pd,Co})(\text{Fe,Ni})_8\text{S}_8$ , соответствуя эквивалентным синтетическим фазам [Кпор et al., 1976].

Гексагональная форма одного из полиминеральных включений (см. рис. 3, з) разительно отличает его от других включений глобулярной морфологии. По всей вероятности, она отражает кристаллографические формы вмещающего осмия в качестве так называемого «отрицательного кристалла». Субидоморфное зерно лаурита  $(\text{Ru}_{0.68}\text{Os}_{0.24}\text{Ir}_{0.08}\text{Fe}_{0.01}\text{Ni}_{0.01})_{\Sigma 1.02}\text{S}_{1.98}$  в этом включении содержит в кайме фазу состава  $(\text{Os}_{0.31}\text{Ru}_{0.26}\text{Fe}_{0.18}\text{Ni}_{0.15}\text{Ir}_{0.11}\text{Rh}_{0.10})_{\Sigma 1.2}\text{S}_{1.8}$ , несколько отклоняющегося от стехиометрии эрликманита. В составах эрликманита в других зернах отмечаются существенные вариации:  $(\text{Os}_{0.40-0.59}\text{Ru}_{0.16-0.39}\text{Ir}_{0.17-0.20}\text{Ni}_{0.01}\text{Fe}_{0.01})_{\Sigma 0.95-0.97}\text{S}_{2.03-2.06}$ . Наблюдаемый рост содержания Os мог, вероятно, обеспечиваться возрастанием значений фугитивности серы  $f_{\text{S}_2}$  в остаточном расплаве, обогащенном Fe и Ni, на заключительной стадии кристаллизации зерен зонального лаурит-эрликманита.

Изученные ассоциации МЭПГ в россыпях р. Ко (см. табл. 4) также представлены Pt-(Pd)-Fe сплавами (изоферроплатина или железистая платина и тетраферроплатина), As-содержащим лауритом, тиошпинелями ЭПГ ряда купроиридсит—феррородсит, ирарситом, осарситом, рутенарсенитом, сперилитом, толовкитом, миасситом, минералами ряда родарсенид—палладоарсенид, инсизваитом, кейтконнитом и неназванным  $\text{Rh}(\text{Bi,Sb})\text{S}$ . В относительно редких, обогащенных рутением ассоциациях, отмечались проявления рутениридосмина и рутения  $[\text{Ru}_{43.0-71.0}\text{Os}_{10.4-36.7}\text{Ir}_{12.7-20.6}\text{Pt}_{0-1.1}]$  с включениями андуонита  $[(\text{Ru}_{0.96}\text{Ir}_{0.06})_{\Sigma 1.02}\text{As}_{1.98}]$ , а также Ru-(Rh)-содержащий пентландит. В одном из включений встречено зерно сплава  $\text{Au}_{68.7}\text{Ag}_{30.3}\text{Ni}_{0.9}$ . Кроме того, минералы серии высокоцит-брэггит и василит отмечались ранее [Barkov et al., 2021b].

Таблица 3. Сопоставление данных рентгеновской дифракции для куваевита и «джиченгита»

<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	Куваевит*		«Джиченгит»**		<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	Куваевит*		«Джиченгит»*	
			<i>d</i>	<i>I</i>	<i>d</i>	<i>I</i>				<i>d</i>	<i>I</i>	<i>d</i>	<i>I</i>
0	0	3	11.4479	17.4	11.41	30	2	$\bar{1}$	18	1.6795	1.9	—	—
1	0	1	6.0350	24.4	6.01	15	4	$\bar{1}$	$\bar{4}$	1.6679	1.4	—	—
1	0	$\bar{2}$	5.7735	32.8	—	—	1	0	$\bar{20}$	1.6535	2.4	—	—
0	0	6	5.7240	16.0	5.70	30	4	$\bar{1}$	5	1.6504	2.8	—	—
1	0	4	4.9891	14.9	4.98	8	0	0	21	1.6354	2.8	—	—
1	0	$\bar{5}$	4.5737	23.5	4.56	12	4	$\bar{1}$	$\bar{7}$	1.6065	1.4	—	—
1	0	7	3.8305	6.6	—	—	4	$\bar{2}$	9	1.6054	6.6	1.600	10
0	0	9	3.8160	10.9	3.80	7	3	$\bar{1}$	16	1.5746	1.3	—	—
2	$\bar{1}$	0	3.5394	12.3	3.52	10	4	0	1	1.5311	6.1	—	—
2	$\bar{1}$	3	3.3814	1.1	3.31	20	3	0	15	1.5246	1.9	1.525	10
2	0	$\bar{1}$	3.0530	42.8	3.05	10	4	$\bar{1}$	$\bar{10}$	1.5237	15.0	—	—
2	0	2	3.0175	0.9	—	—	1	0	22	1.5128	5.6	—	—
2	$\bar{1}$	6	3.0103	100.0	3.00	100	4	0	4	1.5087	3.0	—	—
1	0	10	2.9962	52.5	—	—	4	$\bar{2}$	12	1.5052	4.8	—	—
2	0	$\bar{4}$	2.8867	13.1	2.87	10	2	0	20	1.4981	3.8	1.501	10
0	0	12	2.8620	3.3	2.86	5	4	0	$\bar{5}$	1.4958	7.8	—	—
2	0	5	2.7991	50.0	2.80	50	4	$\bar{1}$	11	1.4932	1.7	—	—
1	0	$\bar{11}$	2.7821	5.6	—	—	2	$\bar{1}$	21	1.4846	1.9	—	—
2	0	$\bar{7}$	2.5996	7.1	2.59	5	4	0	7	1.4629	1.5	—	—
2	0	8	2.4946	31.2	2.48	50	1	0	$\bar{23}$	1.4508	1.3	—	—
3	$\bar{1}$	1	2.3118	3.2	—	—	4	0	$\bar{8}$	1.4434	5.9	—	—
3	$\bar{1}$	$\bar{2}$	2.2962	4.0	—	—	0	0	24	1.4310	2.0	1.428	7
0	0	15	2.2896	3.5	—	—	5	$\bar{2}$	1	1.4052	1.4	—	—
2	0	$\bar{10}$	2.2868	1.0	—	—	5	$\bar{2}$	$\bar{2}$	1.4017	2.9	—	—
1	0	14	2.2776	4.7	2.27	5	4	$\bar{2}$	15	1.4002	5.0	—	—
3	$\bar{1}$	4	2.2370	3.2	—	—	4	$\bar{1}$	14	1.3974	2.3	—	—
3	$\bar{1}$	$\bar{5}$	2.1955	5.5	—	—	3	0	18	1.3946	1.2	—	—
2	0	11	2.1873	31.1	2.18	30	2	0	22	1.3911	2.6	—	—
3	$\bar{1}$	7	2.0952	2.5	2.08	12	5	$\bar{2}$	4	1.3879	1.1	—	—
3	0	0	2.0434	2.6	—	—	3	$\bar{1}$	$\bar{20}$	1.3796	2.6	—	—
1	0	16	2.0259	1.6	—	—	5	$\bar{2}$	$\bar{5}$	1.3778	1.9	—	—
3	0	3	2.0117	0.4	—	—	4	0	$\bar{11}$	1.3758	6.9	—	—
2	0	$\bar{13}$	2.0011	1.5	2.00	5	5	$\bar{1}$	0	1.3378	1.5	—	—
3	0	6	1.9245	29.9	—	—	4	$\bar{1}$	$\bar{16}$	1.3328	1.0	—	—
2	$\bar{1}$	15	1.9224	4.0	—	—	5	$\bar{1}$	6	1.3027	16.6	1.300	15
3	$\bar{1}$	10	1.9208	40.7	1.916	40	5	$\bar{2}$	10	1.3015	6.5	—	—
3	$\bar{1}$	$\bar{11}$	1.8606	4.1	1.902	5	3	$\bar{1}$	22	1.2947	4.8	—	—
4	$\bar{2}$	0	1.7697	73.1	1.765	60	1	0	26	1.2913	4.7	—	—
2	0	16	1.7582	66.3	1.753	50	5	$\bar{2}$	$\bar{11}$	1.2823	1.0	—	—
4	$\bar{2}$	3	1.7489	1.6	—	—	3	0	21	1.2769	1.2	—	—
4	$\bar{1}$	$\bar{1}$	1.6982	2.0	—	—	0	0	27	1.2720	1.8	—	—
4	$\bar{1}$	2	1.6920	3.3	—	—	3	$\bar{1}$	$\bar{23}$	1.2552	1.8	—	—
4	$\bar{2}$	6	1.6907	3.9	—	—	2	0	25	1.2536	2.0	—	—
2	0	17	1.6868	14.4	—	—	4	0	16	1.2473	20.2	1.249	10
3	$\bar{1}$	$\bar{14}$	1.6845	6.2	1.685	20	4	0	17	1.2210	4.9	—	—



Таблица 3. (Окончание)

<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	Куваевит*		«Джиченгит»**		<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	Куваевит*		«Джиченгит»**	
			<i>d</i>	<i>I</i>	<i>d</i>	<i>I</i>				<i>d</i>	<i>I</i>	<i>d</i>	<i>I</i>
5	$\bar{2}$	$\bar{14}$	1.2201	1.0	—	—	5	$\bar{2}$	22	1.0449	4.1	—	—
4	$\bar{1}$	20	1.2082	1.5	—	—	4	$\bar{1}$	26	1.0431	4.4	—	—
4	$\bar{2}$	21	1.2011	5.7	—	—	0	0	33	1.0407	1.4	—	—
2	$\bar{1}$	27	1.1970	1.2	1.195	10	5	$\bar{1}$	21	1.0355	1.1	—	—
4	2	$\bar{1}$	1.1579	1.6	—	—	4	$\bar{2}$	27	1.0329	4.8	—	—
3	3	6	1.1555	1.8	—	—	4	0	25	1.0230	1.1	—	—
5	$\bar{1}$	15	1.1551	1.6	—	—	4	2	16	1.0195	6.4	—	—
5	0	$\bar{10}$	1.1547	4.6	1.153	15	2	0	32	1.0130	7.7	—	—
4	$\bar{1}$	22	1.1499	4.3	—	—	4	2	17	1.0050	1.7	—	—
3	$\bar{1}$	26	1.1475	4.6	—	—	3	0	30	0.9987	1.5	—	—
4	0	20	1.1434	1.6	—	—	5	2	6	0.9675	2.1	—	—
4	2	5	1.1424	2.0	—	—	4	3	10	0.9670	1.6	—	—
5	0	11	1.1412	0.5	—	—	5	$\bar{2}$	26	0.9628	4.2	—	—
2	0	28	1.1388	1.1	—	—	5	$\bar{1}$	27	0.9218	1.0	—	—
4	$\bar{1}$	23	1.1220	1.1	—	—	2	$\bar{1}$	36	0.9211	1.1	—	—
4	2	8	1.1185	1.7	—	—	4	$\bar{2}$	33	0.8971	5.3	—	—
4	$\bar{2}$	24	1.1127	5.4	1.115	5	4	4	0	0.8848	2.2	—	—
5	0	14	1.0967	1.1	1.110	5	4	0	32	0.8791	4.9	—	—
5	$\bar{1}$	18	1.0953	1.3	—	—	5	$\bar{1}$	30	0.8698	2.1	—	—
4	0	22	1.0936	1.1	—	—	3	0	36	0.8644	1.0	—	—
2	$\bar{1}$	30	1.0892	2.0	—	—	3	$\bar{1}$	38	0.8420	1.4	—	—
5	$\bar{2}$	$\bar{20}$	1.0881	1.1	—	—	4	$\bar{2}$	36	0.8398	1.7	—	—
4	2	11	1.0862	1.9	1.087	15	2	0	$\bar{40}$	0.8268	1.3	—	—
5	1	10	1.0485	1.7	—	—						—	—

Примечание. Значения межплоскостных расстояний *d* даны в Å. Приведены отражения с интенсивностью  $I \geq 1$ , (hkl) — индексы кристаллографической плоскости.

\* По данным метода микродифракции Лауэ с использованием синхротронного излучения.

\*\* По данным [Yü et al., 2011].

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

### Вариации составов минералов, родственных куваевиту

Результаты 189 микроанализов (СЭМ/ЭДС и ВДС) выявляют довольно совершенный изоморфизм Ir и Rh в структуре куваевита, торривейзерита, тамураита и ферроторривейзерита (рис. 5). Корреляции между Ir и Rh, с одной стороны, и Ni, Fe, Cu, с другой, в этих составах отсутствуют или статистически незначительны, тем самым подтверждая распределение ЭПГ и Ni-Fe-Cu в отдельных структурных позициях. Значения индекса Ir# [100 Ir/(Ir+Rh+Pt)] изменяются весьма значительно, тогда как вариации Ni# [100 Ni/(Ni+Fe+Cu)] заметно менее масштабны. Наблюдается тенденция некоторого роста значений Ni# с понижением Ir# в исследованных сериях твердых растворов (рис. 6).

Известны другие минеральные виды или неполно изученные сульфиды со сходным куваевиту набором или соотношениями минералообразующих элементов и со значениями Me/S, отклоняющимися от моносульфидной стехиометрии. Куваевит по своему составу и структуре отличается от обертурита (Rh<sub>3</sub>Ni<sub>32</sub>S<sub>32</sub>), являющегося членом группы пентландита ( $a = 10.066(5)$  Å), который открыт в месторождении Марафон комплекса Колдуэлл в Канаде [McDonald et al., 2021]. Он также отличается от феродсита [(Fe,Rh,Ir,Ni,Cu,Co,Pt)<sub>9-x</sub>S<sub>8</sub>] из ультрабазитового массива Нижний Тагил, который имеет тетрагональную ячейку (предложенная пространственная группа  $P42/n$  или  $P4/nmm$ ) с параметрами  $a = 10.009(5)$ ,  $c = 9.840(8)$  Å [Бегизов, Завьялов, 2016]. Некоторые комментарии в отношении феродсита представлялись в обзоре [Gagné et al., 2018].

Таблица 4.

## Составы минералов ЭПГ и ассоциирующих с ними рудных минералов

№	Символ	Cu	Ni	Fe	Co	Ir	Rh	Os	Ru	Pt	Pd	S	As	Sb	Bi	Te	Сумма
		мас. %															
1	Os-1	0	0	0.05	0	25.58	0.04	72.63	1.80	0.08	0	0	0	0	0	0	100.17
2	Os-2	0	0	0.11	0	31.24	0.44	54.31	12.28	1.04	0.03	0	0	0	0	0	99.45
3	Ir	0	0.15	0.57	0	78.75	0.55	17.39	1.79	1.19	0.05	0	0	0	0	0	100.44
4	Pt-(Pd)-Fe сплавы	0.86	1.03	12.04	0	0	0	0	0	68.67	13.71	0	0	0	0	0	96.31
5	»	0.61	2.27	11.17	0	3.84	0	0	0	78.41	0	0	0	0	0	0	96.30
6	»	0	0.89	11.96	0	0	0	0	0	64.55	22.98	0	0	0	0	0	100.38
7	»	3.06	4.90	14.97	0	5.03	2.77	0	0	65.29	1.39	0	0	0	0	0	97.41
8	Tro	0.57	2.69	53.95	0	4.23	0	0	0	0	0	36.52	0	0	0	0	97.96
9	Pn-1	0	33.00	23.31	0.60	0	10.15	0	0	0	0	31.01	0	0	0	0	98.07
10	Pn-2	0	31.78	23.29	0.37	0	11.55	0	0	0	0	30.92	0	0	0	0	97.91
11	Pn-3	0	25.96	30.31	0.93	0	7.21	0	0	0	1.65	31.71	0	0	0	0	97.77
12	Pn-4	0	26.13	29.97	0.90	0	7.64	1.08	0	0	2.03	31.83	0	0	0	0	99.58
13	Pn-5	0.43	31.89	23.39	0	0	10.57	0	0	0	0	31.05	0	0	0	0	97.33
14	Ccp	32.53	0.44	28.91	0	0	0	0	0	0	0	34.34	0	0	0	0	96.22
15	Cbn	22.63	0	39.54	0	0	0	0	0	0	0	35.34	0	0	0	0	97.51
16	Lrt-1	0	0.45	0	0	2.44	0	3.51	56.09	0	0	37.25	0	0	0	0	99.74
17	Lrt-2	0	0	0	0	9.02	0	24.58	33.78	0	0	32.40	0	0	0	0	99.78
18	Lrt-3	0	0	0	0	9.18	3.21	33.17	24.35	0	0	30.98	0	0	0	0	100.89
19	Lrt-4	0	0.33	0	0	4.49	0	12.83	45.70	0	0	35.68	0	0	0	0	99.03
20	Lrt-5	0	0	0.39	0	4.83	0	2.40	54.22	0	0	37.16	0	0	0	0	99.00
21	Lrt (As- содерж.)	0	0	0	0	14.65	1.67	15.82	28.14	3.34	0	26.75	8.38	0	0	0	98.75
22	Cir-1	6.00	0.73	4.94	0	64.33	0	0	0	0	0	22.82	0	0	0	0	98.82
23	Cir-2	6.63	0.31	3.37	0	65.89	0	0	—	0	0	22.77	0	0	0	0	98.97
24	Irs-1	0	0.58	0	0	58.46	0	2.85	2.14	0	0	11.41	25.30	0	0	0	100.74
25	Irs-2	0	0.55	0	0	60.53	0	2.25	1.87	0	0	12.73	23.17	0	0	0	101.10
26	Osa-1	0	0.48	0	0	6.33	0	31.06	15.09	0	0	11.19	31.48	0	0	0	95.63
27	Osa-2	0	0.42	0	0	23.00	0	26.86	8.14	0	0	15.17	21.67	0	0	0	95.26
28	Ras	0	0.74	0	0	0	0	0	56.58	0	0	0	42.45	0	0	0	99.77
29	Spy	0	0.28	0	0	0	0	0	0	54.08	0	0	44.67	—	0	0	99.03
30	Tol	0	—	0	0	51.99	1.96	0	0	0	0	9.81	1.86	33.53	0	0	99.15
31	Mia	2.55	5.00	1.38	0	1.46	60.18	1.05	4.89	0	0	21.83	0	0	0	—	98.34
32	Rda	0	2.56	0.47	0	0	35.41	0	0	0	33.07	0	22.58	0	0	5.4	99.49
33	IsW	0	0.30	0	0	0	0	0	0	31.52	0	0	0	0	60.63	2.66	95.11
34	Kei	0	3.70	0.36	0	0.98	0	1.08	0	0	61.66	0.87	0	0	0	25.93	94.58
35	Неназв. Rh(Bi,Sb)S	0	0	0	0	9.12	27.97	0	0	2.47	0	9.61	0	12.62	37.00	0	98.79

На рисунках 7—9 проводится сопоставление значительного числа опубликованных составов ( $n = 54$ ) минералов, близких куваетиту из различных комплексов и регионов. Они условно пересчитаны на сумму 31 а. ф. е. с целью сопоставления. Эти составы укладываются в единое поле с наблюдаемой отрицательной корреляцией Ni и Fe и ковариациями их значений в ряду от 1 до 6 а. ф. е. Ni и от 2 до 7 а. ф. е. Fe с некоторым разбросом и отклонениями от общего тренда (см. рис. 7). Степень изоморфизма между Ir и Rh является неограниченной (см. рис. 8). При сопоставлении Ir# и Ni# (см. рис. 9) наблюдается довольно обширное поле составов, в котором феродсит из Нижнетагильского массива показывает наиболее низкие значения Ni# (до 30) при весьма масштабных вариациях Ir# (от 0 до 92). На тройной диаграмме Ni—Fe—Cu поля составов отчетливо ограничиваются диапазоном 10—20 ат. % Cu с отдельными значениями, приближающимися к 30 ат. % в обогащенных Fe разновидностях. Такое распределе-

в рудопрооявлениях р. Ко россыпной Сисимской зоны, Восточный Саян

Cu	Ni	Fe	Co	Ir	Rh	Os	Ru	Pt	Pd	S	As	Sb	Bi	Te
<i>Соотношения атомов в формулах</i>														
0	0	0.16	0	24.90	0.07	71.45	3.34	0.08	0	0	0	0	0	0
0	0	0.34	0	27.96	0.73	49.11	20.89	0.92	0.05	0	0	0	0	0
0	0.48	1.88	0	75.38	0.99	16.81	3.26	1.12	0.08	0	0	0	0	0
1.86	2.41	29.63	0	0	0	0	0	48.39	17.71	0	0	0	0	0
1.43	5.77	29.84	0	2.98	0	0	0	59.97	0	0	0	0	0	0
0	1.95	27.59	0	0	0	0	0	42.63	27.82	0	0	0	0	0
6.02	10.43	33.48	0	3.27	3.36	0	0	41.81	1.63	0	0	0	0	0
0.01	0.04	0.89	0	0.02	0	0	0	0	0	1.04	0	0	0	0
0	4.65	3.45	0.08	0	0.82	0	0	0	0	8.00	0	0	0	0
0	4.51	3.47	0.05	0	0.93	0	0	0	0	8.03	0	0	0	0
0	3.62	4.45	0.13	0	0.57	0	0	0	0.13	8.10	0	0	0	0
0	3.62	4.37	0.12	0	0.60	0.05	0	0	0.16	8.08	0	0	0	0
0.06	4.53	3.49	0	0	0.86	0	0	0	0	8.07	0	0	0	0
0.97	0.01	0.98	0	0	0	0	0	0	0	2.03	0	0	0	0
0.99	0	1.96	0	0	0	0	0	0	0	3.05	0	0	0	0
0	0.01	0	0	0.02	0	0.03	0.95	0	0	1.99	0	0	0	0
0	0	0	0	0.09	0	0.25	0.66	0	0	1.99	0	0	0	0
0	0	0	0	0.10	0.06	0.36	0.49	0	0	1.98	0	0	0	0
0	0.01	0	0	0.04	0	0.12	0.82	0	0	2.01	0	0	0	0
0	0	0.01	0	0.04	0	0.02	0.92	0	0	2.00	0	0	0	0
0	0	0	0	0.16	0.03	0.18	0.59	0.04	0	1.77	0.24	0	0	0
0.53	0.07	0.50	0	1.89	0	0	0	0	0	4.01	0	0	0	0
0.60	0.03	0.35	0	1.96	0	0	0	0	0	4.07	0	0	0	0
0	0.03	0	0	0.87	0	0.04	0.06	0	0	1.02	0.97	0	0	0
0	0.03	0	0	0.89	0	0.03	0.05	0	0	1.12	0.87	0	0	0
0	0.02	0	0	0.09	0	0.44	0.40	0	0	0.93	1.12	0	0	0
0	0.02	0	0	0.32	0	0.38	0.22	0	0	1.28	0.78	0	0	0
0	0.02	0	0	0	0	0	0.98	0	0	0	0.99	0	0	0
0	0.02	0	0	0	0	0	0	0.95	0	0	2.04	0	0	0
0	0	0	0	0.91	0.06	0	0	0	0	1.02	0.08	0.92	0	0
0.87	1.85	0.54	0	0.16	12.67	0.12	1.05	0	0	14.75	0	0	0	0
0	0.12	0.02	0	0	0.98	0	0	0	0.89	0	0.86	0	0	0.12
0	0.03	0	0	0	0	0	0	1.01	0	0	0	0	1.82	0.13
0	1.91	0.20	0	0.15	0	0.17	0	0	17.58	0.82	0	0	0	6.16
0	0	0	0	0.16	0.89	0	0	0.04	0	0.99	0	0.34	0.58	0

Примечание. Анализы 1—3 выполнены методом ВДС, ан. 4—35 методом СЭМ/ЭДС. Символы минералов даны по [Warr, 2021]. Составы ан. 1, 2 соответствуют осмию, ан. 3 — иридию, атомные соотношения которых представлены в пересчете на 100 ат. %; 4—7 — Pt-(Pd)-Fe сплавы (пересчет на 100 ат. %); 8 — троилит (Tro) (пересчет на 2 атома на формульную единицу, а.ф.е.). 9—13 Rh-содержащий пентландит (Pn) или обертюрит (17 а.ф.е.); 14 — халькопирит (Csp) (4 а.ф.е.); 15 — кубанит (Cbn) или изокубанит (6 а.ф.е.); 16—20 — лаурит, 21 — As-содержащий лаурит (Lrt) (3 а.ф.е.); 22, 23 — купроирисит-ферродисит (Cir) (7 а.ф.е.); 24, 25 — ирарсит (Irs) (3 а.ф.е.); 26, 27 — осарсит (Osa) (3 а.ф.е.); 28 — рутенарсенит (Ras) (2 а.ф.е.); 29 — сперрилит (Spy) (3 а.ф.е.); 30 — толовкит (Tol) (3 а.ф.е.); 31 — миассит (Mia) (32 а.ф.е.); 32 — родарсенит-палладоарсенит (Rda) (3 а.ф.е.); 33 — инсизваит (Isw) (3 а.ф.е.); 34 — кейтконнит (Kei) (27 а.ф.е.); 35 — незаванный Rh(Bi,Sb)S (3 а.ф.е.). Ноль — ниже предела обнаружения.



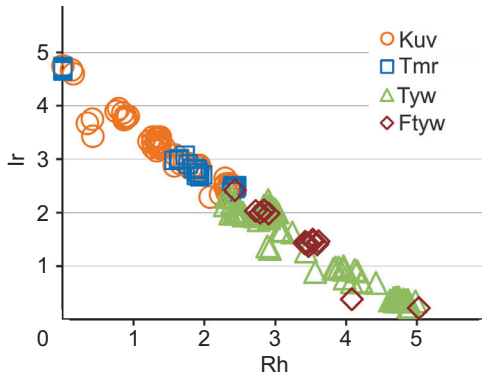


Рис. 5. Вариации составов куваевита (Kuv), тамураита (Tmr), торривейзерита (Tyw) и ферроторривейзерита (Ftyw) из россыпей р. Ко на диаграмме Rh—Ir, выраженные в значениях атомов на формульную единицу (а. ф. е.) в расчете на сумму 31 а. ф. е.

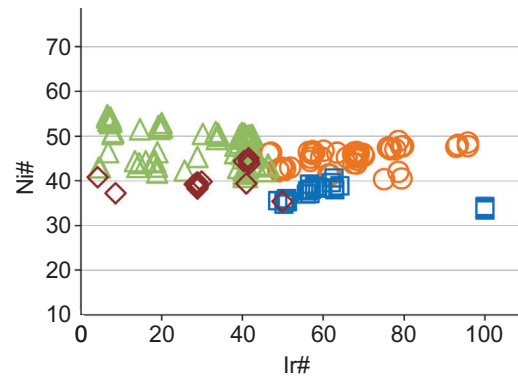


Рис. 6. Вариации значений индексов Ir# [100 Ir/(Ir+Rh+Pt)] и Ni# [100 Ni/(Ni+Fe+Cu)] в составах куваевита, тамураита, торривейзерита и ферроторривейзерита из россыпей р. Ко.

Усл. обозн. см. на рис. 5.

ние могло бы указывать на существование в кристаллической структуре отдельной структурной позиции меди, содержащей от 1 до 3 а. ф. е. Cu, с медианным значением 2 а. ф. е. Cu и возможностью частичного вхождения  $Me^{2+}$ . Интересно отметить, что в случае полного заполнения гипотетической структурной позиции атомами  $Cu^+$  достигался бы баланс зарядов:  $(Ir + Rh)_5^{3+}(Ni + Fe + Co)_7^{2+}Cu_3^+S_{16}^{2-}$ . Эта вероятность, однако, сугубо предположительна и требует дальнейших структурных исследований.

### Генезис полиминеральных включений, содержащих куваевит

Довольно многообразные парагенетические ассоциации во включениях, вмещаемых сплавами Os-Ir-(Ru), формировались из капель остаточного расплава, где последовательно аккумулировались избыточные и так называемые «несовместимые» компоненты, которые не могли войти в кристаллическую структуру сплава. Такие компоненты включают литофильные элементы, халькогены (S, Te), полуметаллы (As, Sb, Bi), основные металлы (Fe, Ni, Cu), а также сравнительно низкотемпературные ЭПГ (Pt, Pd) и Rh, вхождение которых в структуру сплавов было затрудненным или невозможным. Строение зерна на рис. 3, а, в котором сульфидные глобулы и включения развиты в прикраевой части, указывает на вероятное продвижение фронта кристаллизации от центра к краю зерна сплава с последовательным накоплением серы и соответствующим отложением сульфидов по периферии. Наличие микрополостей (см. рис. 4, а) указывает на вероятное присутствие газовой фазы. Довольно совершенная сфероидальная форма (см. рис. 3, б) свидетельствует о развитии глобул мультикомпонентного сульфидного расплава, из которого впоследствии кристаллизовался куваевит и сосуществующие с ним минералы. В отдельных случаях остаточный расплав оттеснялся во внутренние полости (гексагонального сечения), ограниченные гранями и кристаллографическими формами вмещающего Os-Ir сплава. Такие образования (см. рис. 3, в) могут быть отнесены к «отрицательным кристаллам».

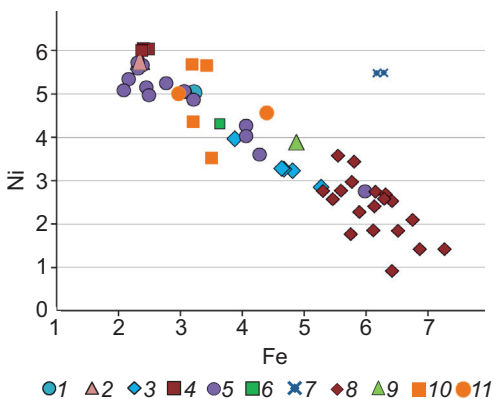
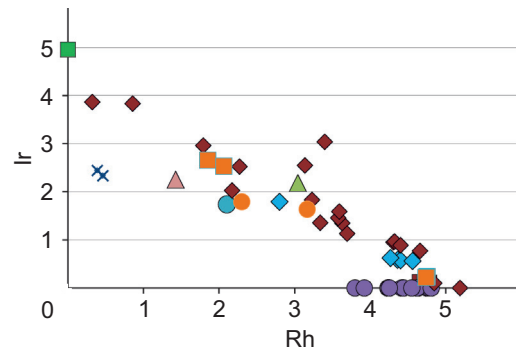


Рис. 7. Вариации составов минералов, родственных куваевиту, на диаграмме Fe—Ni в значениях атомов на формульную единицу (а. ф. е.), рассчитанных на сумму 31 а. ф. е.

Показаны составы из офиолитов массива Троодос, Кипр (1) [McElduff, Stumpf, 1990], офиолитовых хромититов района Зетфорд, Канада (2) [Corrivaux, Laflamme, 1990], россыпей района Джубдо (Юбдо), Эфиопия (3) [Евстигнеева и др., 1992], расслоенной интрузии Пенникат, Финляндия (4) [Barkov et al., 2005]; месторождения Марафон в комплексе Колдуэлл, Канада (5) [Ames et al., 2017; Good et al., 2017; McDonald et al., 2021]; района Джиченг, Китай (6) [Yü et al., 2011], массивов Кондер (7) [Nekrasov et al., 2005] и Нижний Тагил (8) [Бегизов, Завьялов, 2016], а также россыпных рудопроявлений из районов Миасс (9), Сисим (10) и Сейба (11) [Barkov et al., 2018a, b, 2019].

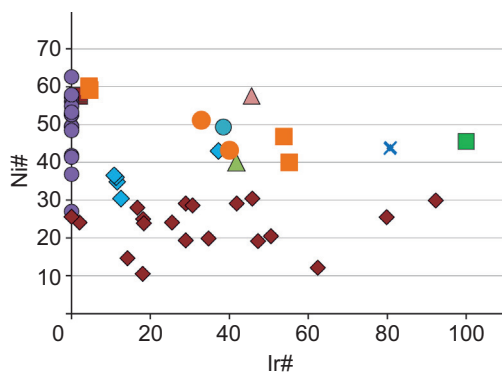
**Рис. 8. Вариации составов минералов, родственных куваевиту, на диаграмме Rh—Ir в значениях атомов на формульную единицу (а. ф. е.), пересчитанных на сумму 31 а. ф. е.**

Усл. обозн. и ссылки см. на рис. 7.



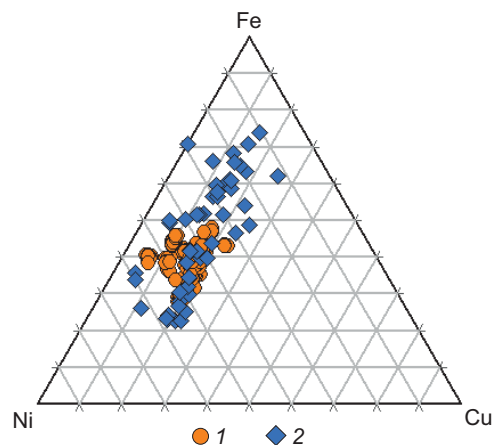
Одно из охарактеризованных ранее глобулярных включений в Ir-Os сплаве из россыпи р. Ко [Barkov et al., 2021b] приводит к довольно интересным петро- и рудогенетическим наблюдениям. В ядре этого включения установлена неравновесная ассоциация микрокристаллического оливина ( $Fo_{73-76}$ ) и натрового плагиоклаза ( $Ab_{82-86}$ ) в ассоциации со скелетными кристаллами и ламеллями титанистого авгита:  $Wo_{40.8-43.2}En_{26.5-29.3}Fs_{20.3-22.6}Aeg_{6.9-9.5}$  (2.82—3.12 мас. %  $TiO_2$ ). Альбитовый состав плагиоклаза в оливин-плагиоклазовом ядре существенно отличает его от известных ранее примеров «плагиоклаз-оливиновых включений» (POIs) из углистых хондритов [Sheng et al., 1991] и оливин-анортитовых расплавленных включений в алливалитах [Фролова и др., 2001]. Ассоциация  $Fo_{73-76} + Ab_{82-86} +$  скелетные формы титанистого авгита указывают на метастабильные условия кристаллизации в условиях переохлаждения остаточного силикатного расплава. По периферии альбит-оливинового ядра развита сульфидная ассоциация, состоящая из МЭПГ близкого ферроторривейзериту состава, родиевого пентландита или обертюрита, лаурита, высокоцита, василита и Pt-Pd-Fe сплавов. Таким образом, прослеживается весьма эффективная дифференциация и фракционирование S и рудных компонентов, ЭПГ, Cu-Ni-Fe с их избирательным накоплением в поздней составляющей остаточного расплава, кристаллизовавшегося после силикатного ядра [Barkov et al., 2021b].

В рудных ассоциациях р. Ко характерно довольно широкое развитие сульфидов и сульфоарсенидов ЭПГ, включая лаурит, что может косвенно указывать на формирование коренного оруденения ЭПГ в хромитоносных зонах [Barkov, Fleet, 2004]. Сульфидная Fe-Ni-Cu минерализация включений (см. табл. 4) представлена троилитом, Rh-содержащим пентландитом (и/или обертюритом), халькопиритом, кубанитом и/или изокубанитом. Экспериментальные данные в системе Cu-Fe-S [Kosyakov, Sinyakova, 2017] показывают, что изокубанит способен кристаллизоваться непосредственно из расплава, не являясь следовательно результатом твердофазной реакции или трансформации промежуточного твердого раствора. Формирование троилита предполагает довольно восстановительные условия. Однако в других полиминеральных включениях отмечался магнетит, напротив, отражающий сравнительно окислительную среду локального минералообразования. В месторождении Марафон значительная роль отводится росту фугитивности кислорода  $f_{O_2}$ , чем, вероятно, обуславливалось формирование торривейзерита и ферроторривейзерита посредством прогрессирующего процесса окисления зерен пентландита и промежуточного обертюрита [McDonald et al., 2021].



**Рис. 9. Вариации значений индексов Ir# [100 Ir/(Ir + Rh + Pt)] и Ni# [100 Ni/(Ni + Fe + Cu)] в составах минералов, родственных куваевиту.**

Усл. обозн. и ссылки см. на рис. 7.



**Рис. 10. Вариации составов куваевита, тамураита, торривейзерита и ферроторривейзерита на тройной диаграмме Ni—Fe—Cu (ат. соотношения):**

из россыпей р. Ко в сопоставлении с составами родственных минералов из разных массивов и регионов (указаны на рис. 7), показанных на рис. 10, усл. 2 для упрощения.

Широкие вариации в составах минералов, родственных куваевиту (см. рис. 9), могут прежде всего отражать петрогеохимические характеристики среды минералообразования, включая значения Ni/Fe и Rh/Ir, варьирующие в различной степени дифференцированных расплавах или флюидах в рудоносных зонах комплексов. Минимальные значения Ni# в зернах феродсита в ультрамафитах Нижнетальского интрузива могут быть изначально связаны с обедненной никелем средой. Вместе с тем обсуждаемые сульфиды имеют структуру, деривативную от таковой пентландита. Поэтому при их формировании роль  $f_{S_2}$  может быть довольно значимой, так как существенно контролирует значения Ni/Fe и может обуславливать тренд возрастания содержаний Ni в пентландите [Колонин и др., 2000]. Пониженные значения Ir# (см. рис. 9) могут быть закономерно связаны с понижающейся температурой кристаллизации, что прослеживалось в зональных зернах сульфидоарсенидов Ni-Co и ЭПГ [Barkov et al., 1999, 2004]. Такие тренды кристаллизации вполне ожидаемы с общегеохимических позиций, поскольку Ir входит в отдельную подгруппу ЭПГ с существенно более высокой точкой плавления, чем Rh. Однако систематическое обеднение иридием составов родиевого пентландита (или обертюрита), находящегося в сосуществовании с куваевитом, может, скорее, отражать фактор кристаллохимического свойства, в связи с которым  $Ir^{3+}$  не мог войти в структуру при данных условиях.

Следует отметить, что в нескольких случаях устанавливается отчетливо более поздняя кристаллизация куваевита и его аналогов по отношению к сосуществующему Rh-содержащему пентландиту или обертюриту. Такие наблюдения включают развитие каймообразных выделений куваевита и закономерно ориентированных ламелл торривейзерита и ферроторривейзерита (экссолуционного происхождения) во вмещающем пентландите. Таким образом, можно предполагать, что структура пентландита не была способна принять ЭПГ выше предельно допустимых уровней, тем самым обуславливая последующую структурную трансформацию фаз аналогов куваевита, кристаллизующихся в условиях прогрессирующего накопления ЭПГ в расплаве.

В целом парагенетическая ассоциация куваевита (торривейзерита, тамураита и ферроторривейзерита) с другими сульфидами ЭПГ: лауритом-эрликманитом, родиевым пентландитом, высокоцитом-брэггитом, василитом и другими МЭПГ, вероятно, формировалась при сравнительно низкотемпературных условиях кристаллизации. Лаурит нередко причисляется к минералам наиболее высокотемпературного магматического происхождения [Andrews, Brenan, 2002], однако вполне может кристаллизоваться при низких температурах на гидротермальной стадии минералообразования [Barkov, Fleet, 2004].

#### Первичный источник куваевита и МЭПГ Сисимской россыпной зоны

Как отмечалось, лысанский расслоенный комплекс является вероятным коренным источником как куваевита, так и широкого спектра видов МЭПГ, ассоциирующих в россыпных рудопроявлениях бассейна р. Сисим. Этот комплекс, включающий Лысанский, Подлысанский и Кедранский массивы, отнесен к габбро-пироксенитовой формации [Глазунов, 1975]. Коренные выходы лысанского комплекса в Сисимском районе (см. рис. 1) представлены крупными и многочисленными телами габбро, клино-, ортопироксенитов и серпентинитов преимущественно северо-западного простирания [Щелковников, Ткач, 1962; Глазунов, 1975]. Россыпные ассоциации МЭПГ р. Сисим и ее притоков Сейба и Ко имеют принципиальное сходство, что согласуется с единым коренным источником их россыпеобразования.

В шлиховых материалах из россыпной зоны р. Сисим установлены зерна хромшпинелидов варьирующей магнезиальности, включая магнезиохромит [Barkov et al., 2018a]. Присущая ему весьма высокая магнезиальность предполагает парагенетическую ассоциацию с высокофорстеритовым оливином. На этом основании можно вполне обоснованно предполагать, что минерализация ЭПГ в Сисимском россыпном районе генетически связана с коренными зонами хромититов, локализованных в нижних ультраосновных дифференциатах (преобразованных в серпентиниты) лысанского расслоенного комплекса. Довольно широкий спектр составов хромшпинелидов [Barkov et al., 2018a] указывает на их поступление из различных структурно-вещественных подразделений этого комплекса в ходе длительно и масштабно проявленных процессов эрозии, с последующей транспортировкой и совместной аккумуляцией фракций МЭПГ и золота водными потоками.

Лысанскому комплексу свойственна значительная Ti специализация [Глазунов, 1975], что находит свое соответствие в наблюдаемых особенностях россыпной платинометаллической ассоциации Сисимского района. В зернах МЭПГ отмечались пористые включения с высоким содержанием титана и титанита, а также включения скелетных кристаллов и ламелл титансодержащего авгита. Общее обогащение Ti и геохимическая специфика сочетаются с ранее обнаруженным и фактически уникальным сростанием лаурита с монацитом-(Ce) [Barkov et al., 2018a, 2021b]. Можно ожидать повышенный геохимический потенциал Ti в коренных рудных зонах хромититов.



Таким образом, с нижними структурно-вещественными уровнями, представленными хромититами и хромитоносными ультрамафитами (серпентинитами) лысанского расслоенного комплекса, могут быть связаны зоны коренной низкосульфидной ЭПГ минерализации, имеющей основную Os-Ir-Ru-(Rh) специализацию.

## ВЫВОДЫ

1. Куваевит,  $(\text{Ir,Rh})_5(\text{Ni,Fe,Cu})_{10}\text{S}_{16}$ , имеющий идеальную формулу  $\text{Ir}_5\text{Ni}_{10}\text{S}_{16}$ , является новым минеральным видом, открытым нами в рудопоявлениях р. Ко Сисимской россыпной зоны, Восточный Саян. Определена его тригональная сингония с параметрами  $a = 7.079(5) \text{ \AA}$ ,  $c = 34.344(12) \text{ \AA}$ ,  $V = 1490(2) \text{ \AA}^3$ ,  $Z = 3$  и вероятная пространственная группа  $R\bar{3}m$  (#166). Новый минерал и его название рассмотрены и утверждены Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации минералов Международной минералогической ассоциации (IMA 2020-043).

2. Куваевит обнаружен во включениях глобулярной формы в зернах Os-Ir-(Ru) сплавов. Он формирует значительные серии твердых растворов с торривейзеритом ( $\text{Rh}_5\text{Ni}_{10}\text{S}_{16}$ ), тамураитом ( $\text{Ir}_5\text{Fe}_{10}\text{S}_{16}$ ) и ферроторривейзеритом ( $\text{Rh}_5\text{Fe}_{10}\text{S}_{16}$ ), которым изоструктурен. Основными ассоциирующими с ним минералами являются Rh-содержащий пентландит и/или обертюрит, минералы серии лаурит-эрликманит и Pt-(Pd)-Fe сплавы.

3. Ассоциации минералов ЭПГ и других рудных минералов, изученные нами в россыпях р. Ко, отличаются существенным разнообразием и насчитывают около тридцати минеральных видов и неназванных соединений. Проведено сопоставление характера вариаций составов минералов, родственных куваевиту, из различных комплексов и регионов.

4. Парагенетическая ассоциация куваевита с торривейзеритом, тамураитом, ферроторривейзеритом и сульфидами ЭПГ: лауритом-эрликманитом, родиевым пентландитом, висоцкитом-брэггитом, василитом и другими минералами ЭПГ формировалась при сравнительно низкотемпературных условиях кристаллизации.

5. Куваевит и другие минералы включений кристаллизовались из капель остаточного расплава, где последовательно накапливались избыточные и несовместимые компоненты, которые не могли войти в кристаллическую структуру сплава: литофильные элементы, халькогены (S, Te), полуметаллы (As, Sb, Bi), основные металлы (Fe, Ni, Cu), а также сравнительно низкотемпературные ЭПГ (Pt, Pd) и Rh.

6. В качестве вероятного коренного источника куваевита и других минералов ЭПГ платинометалльной минерализации россыпной зоны Сисим предлагается лысанский расслоенный комплекс, слагаемый габбро, пироксенитами, дунитами и серпентинитами. С его нижними структурно-вещественными уровнями, представленными хромититами и хромитоносными ультрамафитами, могут быть связаны коренные зоны низкосульфидной минерализации ЭПГ, имеющей Os-Ir-Ru-(Rh) специализацию.

Авторы благодарны рецензентам и редколлегии журнала, а также сотрудникам Аналитического центра многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН за разностороннее и благожелательное содействие.

Выполненное исследование поддержано Российским научным фондом (проект № 22-27-00419). Работа также выполнялась по государственному заданию ИГМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

## ЛИТЕРАТУРА

**Бегизов В.Д., Завьялов Е.Н.** Феродсит  $(\text{Fe,Rh,Ir,Ni,Cu,Pt,Co})_{9-x}\text{S}_8$  — новый минерал из Нижнетагильского ультраосновного массива // Новые данные о минералах, 2016, т. 51, с. 8—11.

**Высоцкий Н.К.** Платина и районы ее добычи. Кн. 5. Обзор месторождений платины вне Урала. Л., Изд-во АН СССР, 1933, 230 с.

**Глазунов О.М.** Геохимия и петрология габбро-пироксенитовой формации Восточного Саяна. Новосибирск, Наука, 1975, 201 с.

**Евстигнеева Т.Л., Кудрявцев А.С., Рудашевский Н.С.** Минералы элементов платиновой группы из Юбдо (Эфиопия) // Минералогический журнал, 1992, т. 14, № 1, с. 29—41.

**Колонин Г.Р., Орсов Д.А., Синякова Е.Ф., Кислов Е.В.** Использование отношения Ni:Fe в пентландите для оценки летучести серы при формировании ЭПГ-содержащего сульфидного оруденения Йоко-Довыренского массива // ДАН, 2000, т. 370, №1, с. 87—91.

**Кривенко А.П., Толстых Н.Д., Нестеренко Г.В., Лазарева Е.В.** Типы минеральных ассоциаций платиноидов в золотоносных россыпях Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика, 1994, т. 35 (1), с. 70—78.

**Толстых Н.Д., Кривенко А.П.** О составе сульфидов, содержащих элементы платиновой группы // Зап. ВМО, 1994, т. 123, № 2, с. 41—49.

- Фролова Т.И., Плечов П.Ю., Тихомиров П.Л., Чураков С.В.** Расплавные включения в минералах алливалитов Курило-Камчатской островной дуги // *Геохимия*, 2001, т. 39, № 4, с. 336—346.
- Цыкин Р.А., Попова Н.Н.** Особенности золота из россыпей северо-западной части Восточного Саяна // *Изв. Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*, 2008, т. 32, № 6, с. 26—32.
- Щелковников А.Д., Квач В.Н.** Геологическая карта СССР м-ба 1:200 000. Серия Минусинская. Лист N-46-XVI. М., Госгеолтехиздат, 1962.
- Ames D.E., Kjarsgaard I.M., McDonald A.M., Good D.J.** Insights into the extreme PGE enrichment of the W horizon, Marathon Cu–Pd deposit, Coldwell alkaline complex, Canada: platinum-group mineralogy, compositions and genetic implications // *Ore Geol. Rev.*, 2017, v. 90, p. 723—747.
- Andrews D.R.A., Brenan J.M.** Phase-equilibrium constraints on the magmatic origin of laurite + Ru–Os–Ir alloy // *Can. Mineral.*, 2002, v. 40, p. 1705—1716.
- Barkov A.Y., Fleet M.E.** An unusual association of hydrothermal platinum-group minerals from the Imandra layered complex, Kola Peninsula, northwestern Russia // *Can. Mineral.*, 2004, v. 42, p. 455—467.
- Barkov A.Y., Thibault Y., Laajoki K.V.O., Melezhik V.A., Nilsson L.P.** Zoning and substitutions in Co–Ni–(Fe)–PGE sulfarsenides from the Mount General'skaya layered intrusion, Arctic Russia // *Can. Mineral.*, 1999, v. 37, p. 127—142.
- Barkov A.Y., Fleet M.E., Martin R.F., Alapieti T.T.** Zoned sulfides and sulfarsenides of the platinum-group elements from the Penikat layered complex, Finland // *Can. Mineral.*, 2004, v. 42, p. 515—537.
- Barkov A.Y., Fleet M. E., Martin R. F., Halkoaho T.A.A.** New data on «bonanza»-type PGE mineralization in the Kirakkajuppura PGE deposit, Penikat layered complex, Finland // *Can. Mineral.*, 2005, v. 43, p. 1663—1686.
- Barkov A.Y., Shvedov G.I., Nikiforov A.A., Martin R.F.** Platinum-group minerals from Seyba, Eastern Sayans, Russia, and substitutions in the PGE-rich pentlandite and ferhodsites series // *Mineral. Mag.*, 2019, v. 83, p. 531—538.
- Barkov A.Y., Shvedov G.I., Martin R.F.** PGE–(REE–Ti)-rich micrometer-sized inclusions, mineral associations, compositional variations, and a potential lode source of platinum-group minerals in the Sisim Placer Zone, Eastern Sayans, Russia // *Minerals*, 2018a, v. 8, p. 181.
- Barkov A.Y., Tolstykh N.D., Shvedov G.I., Martin R.F.** Ophiolite-related associations of platinum-group minerals at Rudnaya, western Sayans, and Miass, southern Urals, Russia // *Mineral Mag.*, 2018b, v. 82, p. 515—530.
- Barkov A.Y., Tolstykh N.D., Martin R.F., McDonald A.M.** Tamuraite,  $\text{Ir}_5\text{Fe}_{10}\text{S}_{16}$ , a new species of platinum-group mineral from the Sisim Placer Zone, Eastern Sayans, Russia // *Minerals*, 2021a, v. 11, p. 545.
- Barkov A.Y., Tolstykh N.D., Tamura N., Martin R.F., McDonald A.M., Cabri L.J.** Ferrotorryweiserite,  $\text{Rh}_5\text{Fe}_{10}\text{S}_{16}$ , a new mineral species from the Sisim Placer Zone, Eastern Sayans, Russia, and the torryweiserite–ferrotorryweiserite series // *Minerals*, 2021b, v. 11, p. 1420.
- Corrivaux L., Laflamme J.H.G.** Mineralogy of platinum-group elements in chromitites in ophiolites at Thetford mines, Quebec // *Can. Mineral.*, 1990, v. 28, p. 579—595.
- Gagné O.C., Belakovskiy D.I., Cámara F., Uvarova Y., Cabri L.J.** New mineral names // *Am. Mineral.*, 2018, v. 103, p. 828—835.
- Good D.J., Cabri L.J., Ames D.E.** PGM facies variations for Cu–PGE deposits in the Coldwell alkaline complex, Ontario, Canada // *Ore Geol. Rev.*, 2017, v. 90, p. 748—771.
- Jemetio J.P.F., Zhou P., Kleinke H.** Crystal structure, electronic structure and thermoelectric properties of  $\text{Cu}_4\text{Sn}_7\text{S}_{16}$  // *J. Alloys Compd.*, 2006, v. 417, p. 55—59.
- Knop O., Huang C.-H., Reid K.I.G., Carlow J.S.** Chalcogenides of the transition elements. X. X-ray, neutron, Mössbauer and magnetic studies of pentlandite and the  $\pi$  phases,  $\pi$  (Fe, Co, Ni, S),  $\text{Co}_8\text{MS}_8$  and  $\text{Fe}_4\text{Ni}_4\text{MS}_8$  (M = Ru, Rh, Pd) // *J. Solid State Chem.*, 1976, v. 16, p. 97–116.
- Kosyakov V.I., Sinyakova E.F.** Study of crystallization of nonstoichiometric isocubanite  $\text{Cu}_{1.1}\text{Fe}_{2.0}\text{S}_{3.0}$  from melt in the system Cu–Fe–S // *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2017, v. 129, p. 623—628.
- McDonald A.M., Kjarsgaard I.M., Cabri L.J., Ross K.C., Ames D.E., Bindi L., Good D.J.** Oberthürite,  $\text{Rh}_3(\text{Ni,Fe})_{32}\text{S}_{32}$ , and torryweiserite,  $\text{Rh}_5\text{Ni}_{10}\text{S}_{16}$ , two new platinum-group minerals from the Marathon deposit, Coldwell complex, Ontario, Canada: descriptions, crystal-chemical considerations, and comments on the geochemistry of rhodium // *Can. Mineral.*, 2021, v. 59, p. 1833—1863.
- McElduff B., Stumpff E.F.** Platinum-group minerals from the Troodos ophiolite, Cyprus // *Mineral. Petrol.*, 1990, v. 42, p. 211—232.
- Nekrasov I.Ya., Lennikov A.M., Zalishchak B.L., Oktyabrsky R.A., Ivanov V.V., Sapin V.I., Taskaev V.I.** Compositional variations in platinum-group minerals and gold, Konder alkaline ultrabasic massif, Aldan Shield, Russia // *Can. Mineral.*, 2005, v. 43, p. 637—654.

**Sheng Y.J., Hutcheon I.D., Wasserburg, G.J.** Origin of plagioclase-olivine inclusions in carbonaceous chondrites // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, v. 55, p. 581—599.

**Tamura N.** XMAS: A versatile tool for analyzing synchrotron X-ray microdiffraction data // *Strain and dislocation gradients from diffraction* / Eds. R. Barabash, G. Ice. London, UK, Imperial College Press, 2014, p. 125—155.

**Warr L.N.** IMA–CNMNC approved mineral symbols // *Mineral. Mag.*, 2021, v. 85 (3), p. 291—320.

**Yü Z., Hao Z., Wang H., Yin S., Cai J.** Jichengite,  $3\text{CuIr}_2\text{S}_4 \cdot (\text{Ni}, \text{Fe})_9\text{S}_8$ , a new mineral, and its crystal structure // *Acta Geol. Sin.*, 2011, v. 85 (5), p. 1022—1027.

*Поступила в редакцию 5 января 2022 г.,  
принята в печать 13 мая 2022 г.*